



風力発電用大容量永久磁石発電機に関する研究

著者	木村 守
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第15807号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58655

氏名	木村 守
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気エネルギーシステム専攻
学位論文題目	風力発電用大容量永久磁石発電機に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 斎藤 浩海 東北大学教授 津田 理

論文内容要約

1997 年 12 月気候変動枠組条約第 3 回締約国会議 (COP3, 京都会議) において採択された京都議定書により先進国及び市場経済移行国の温室効果ガス排出削減の数値目標が取り決められた。温室効果ガスとして二酸化素, メタン及び亜酸化窒素などの排出量が制限されたため, 温室効果ガスの排出源となる化石燃料を使用しない自然エネルギーによる発電設備が注目されている。自然エネルギーを用いた発電設備としては, 太陽光発電, 風発電, 地熱発電, 及び水力発電などがあげられるが, そのなかでも風力発電は, 比較的インシヤルコストが少いことや, 夜間でも発電が可能であることから自然エネルギーを用いた発電設備としては, 比較的低コストなこと, 風力エネルギーは自由に使える純国産エネルギーといえるため, エネルギー自給率を高めることができるなどのメリットがあることから大きな期待が集まっている。

1990 年頃 1MW 級の大容量の高性能風車が開発されたことにより, 2000 年頃から風力発電の導入量が飛躍に増大した。2009 年から 2012 年はリーマンショックの影響で, 導入量の伸びは鈍化しているが, 2012 年においては約 40GW 導入されている。また, 2013 年以降の導入量は増減するものの, 全体の傾向として風力発電は洋上, 陸上とも増大していくものと考えられる。

一般に, 風力発電に適した風速は 3 段階の階級に分けられ, 前述のように風車の導入が進むと, 風況の良い風力発電に最も適している場所 (IEC61400 Class1 : 年平均風速 10m/s 以上) は少なくなり, 平均風速が 7m/s 程度 (Class2 : 年平均風速 8.5m/s 以上, Class3 : 年平均風速 7.5m/s 以上) の比較的低風速の低い場所への建設が進められる状況になってきた。そのため, 平均風速が低い場所でも発電電力量をより効率的に取り出すことのできる発電システムの要求が高まっている。そのため, 当初用いられてきた一定速のかご形誘導発電機を用いた風力発電システムでは, 低風速域における高効率運転が困難なため, 低風速域でも効率の良い可変速風力発電システムが望まれている。可変速風力発電システムは, 現時点では巻線形誘導発電機, 直流励磁同期発電機, 直流励磁同期発電機ならびに永久磁石を界磁とする同期発電機である永久磁石発電機をダイレクトドライブ, ギア有りなど, 種々の方式で開発が進められている。例えば, 米国 National Renewable Energy Laboratory より風車や増速ギアなどの機械系と発電機および変換器を組み合わせた場合のシステム効率が検討されている。それに

よると 750kW, 1.5MW, 3MW システムにおいて、ダイレクトドライブや、1 段ギアシステムの他、増速ギアにより複数台の発電機を運転する Multi-generator system などドライブトレインを変更した場合のシステム効率について試算し、発電効率の点ではダイレクトドライブが有利なことを明らかにしている。しかしながら、風速出現頻度をもとにした、発電機システムの発電量を考慮した検討例は少ない。

また、MW級の大容量の風力発電設備としては、高さ約 100m ほどのタワー最上部にあるナセル内に、それぞれのシステムにあわせて発電機、ギア、電力変換器、及び変圧器などが配置されている。電力変換器や変圧器は、ナセル軽量化のためタワー下部に配置されることもある。

ナセルの寸法、質量はタワーの強度すなわちイニシャルコストに反映されるため、各機器の寸法、質量は細かく制限されている。発電機システムの軽量化対策として三段ギアで回転速度を上げ、かつ永久磁石発電機を適用することにより発電機の小型化を図った例もある。

一方、1990 年代以降風車が大量導入されてから約 20 年たち、ギアなどの伝動装置の故障が目立つようになったこと、今後拡大が見込まれる洋上風車では、風車の保守が容易ではないことから、故障の少ないダイレクトドライブ方式の風力発電機の開発を強く進める動きもある。ダイレクトドライブ方式は、回転速度が遅く発電機の質量が必然的に大きくなるため、直流励磁型同期発電機ではなく、永久磁石発電機として小型軽量化を進めているという発表もある。発電機の小型軽量化は先に述べたように、風車設備全体のイニシャルコストに影響するため、永久磁石発電機とするメリットは大きい。

一方、永久磁石発電機を採用するためには、希土類磁石が必要になり、その磁石材料となる軽希土類のネオジウム（Neodymium, 元素記号 Nd）や重希土類のディスプロシウム（Dysprosium, 元素記号 Dy）などの資源問題を避けて通れない。ネオジウムは中国以外からも産出されるが、ディスプロシウムは 2013 年現在、中国南部にしか産出箇所がなく、かつ、希土類磁石の保持力を向上させる元素としてディスプロシウムは欠かすことのできない元素であり資源的なリスクが特に高い。その例として、2011 年尖閣諸島問題に端を発する中国レアアースの輸出規制は、日本の磁石関連産業に大きな影響を与え、脱レアアース、省レアアースの動きが強まっている。（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）を中心に、この資源リスクに備えた研究開発が盛んになっている。

このような流れのなか、風力発電用永久磁石発電機の永久磁石使用量は、ダイレクトドライブ永久磁石発電機では約 1000kg/MW、三段ギア永久磁石発電機では約 100kg/MW となるため、2010 年 7 月以降のレアアースの高騰を考慮すると、風力発電用永久磁石発電機として普及させるためには、今後より一層の永久磁石使用量の削減が必要である。

また、風力発電用永久磁石発電機では、系統に接続する際に電力変換器が必須となり、電力変換器のパワーデバイスのスイッチングによる高調波損失が避けられないことから、永久磁石発電機の更なる小形、高効率化に向け、高調波損失対策の重要性が高まっている。

本論文は、風力発電用発電機において、①永久磁石発電機を検討する際に必要となる、高調波入力解析において計算時間を短縮できる手法を提案すること、②風力発電用発電機として、小形、高効率な高速タイプの永久磁石発電機の最適設計法を確立すること、③5MW 規模の次世代風車として最適な発電機システムを明らかにすることを目的とした。

本論文は以下の章構成となる。

第1章は緒言であり本論文の背景と目的を述べている。

第2章では、永久磁石発電機の回転子磁石損失の算定法について述べている。永久磁石発電機の制御に必要なAC/DC変換器は、一般にPWMコンバータが使用されるが、その電圧には種々の高調波が含まれる。永久磁石発電機では、発電機の小型軽量化のために、ネオジム磁石を使用しているが、ネオジム磁石は電気抵抗が小さくうず電流が流れやすい。そのため上記の高調波により磁石にうず電流が流れ、生じる損失により磁石が発熱し、場合によっては熱減磁が発生する可能性がある。そのため、発電機の設計においては、発生する高調波損失と、それによる永久磁石の温度上昇を算定する必要がある。

一般に、風力発電システムに用いられているインバータの多くが電圧型インバータであるため、永久磁石発電機の設計段階において、PWMの電圧波形を与えられることはあっても、電流波形は発電機の磁気回路に起因するインダクタンスの影響を受けるため、高調波電流が入力条件として与えられることは少ない。永久磁石発電機の非線形性、磁石のうず電流等を勘案すると、精度良く損失を評価する手段として、電圧を入力とする発電機の磁界解析が利用される。しかしながら、PWM波形は急峻な電圧の立ち上がりの連続であり、高次にわたる周波数成分が含まれるため、外部回路と連成した有限要素法(Finite Element Method, 以下FEM)磁界解析では、時間ステップの刻みを細かく設定しなければならず、解析時間が長時間に及ぶ場合があるという課題がある。

このため、電圧入力FEM磁界解析と異なるPWM電流波形解析手段として、 $d-q$ 軸方程式に基づく方法に着目し、永久磁石発電機に適用できる高速な損失解析手法を提案する。検討内容は、交差磁化作用を考慮したリアクタンス、磁石磁束に基づく基本波特性と、PWM波形に含まれる高次高調波に対するリアクタンスをFEM磁界解析によって検討した。すなわち、線形リアクタンスのみを考えた場合と比較することによって、電流波形の再現精度を数値的に確認した。

第3章では、2MWの風力発電用高速永久磁石発電機に適した回転子構造について述べている。大容量高速タイプでは特に、冷却、電気特性、機械強度の検討が課題となり、これらを考慮して回転子を設計し、試作検証を行っている。

大容量風力用永久磁石発電機としては、ダイレクトドライブ低速タイプの発表事例はあるが、ギア付き高速タイプの永久磁石発電機としては筆者の調べた範囲では詳細設計に関する報告事例は殆ど無いようである。大容量高速タイプの永久磁石発電機では、永久磁石に発生する遠心力が大きく、磁石を保持するために回転子鉄心内に磁石を埋め込んだ埋込磁石構造とする必要がある。埋込磁石型回転子においては、回転子強度と電気的特性の間

にはトレードオフの関係があるため、これらの特性のバランス設計が必要である。さらに、大形機特有の問題として、直径 1m 程度の回転子鉄心にパンチング加工する際の加工精度があげられる。回転子鉄心に加工する磁石挿入孔と磁石の隙間の、寸法公差をある程度大きくせざるを得ないという問題がある。この寸法公差に起因して、磁気ギャップ長が変化するため特性のばらつきが大きく、ロバスト設計が課題となる。また、大容量機では冷却のため軸方向にラジアルダクトを設けることが多いが、永久磁石発電機では、回転子に磁石を挿入する際にダクトが邪魔になり、回転子にダクトを設けることができない。

本章では、2MW 高速永久磁石発電機に適した回転子構造について、特に大容量高速タイプの永久磁石発電機で問題となる、冷却面、電気特性面、機械強度面について考察した。

第4章では、風力発電用発電機の種類と特徴を整理し、次世代の 5MW 級風力発電に適した発電機について検討を行っている。近代風力発電では、揚力形の風車を用いていることが特徴として挙げられるが、動力伝達系においても一定速から可変速風車へと進化を遂げている。この変化について発電機システム構成をもとに説明をする。また、風力発電では永久磁石発電機のほかに、かご形誘導発電機、交流励磁同期発電機、直流励磁同期発電機が使用されている。発電機が異なることにより、風力発電システムとして、さまざまな特性の違いが現れる。そこで、現在各国で検討されている大容量のオフショア向けとして 5MW 風力発電システム(24)を想定し、永久磁石発電機、かご形誘導発電機、交流励磁同期発電機、直流励磁同期発電機それぞれについて、ギアならびに電力変換器を考慮して、システム効率、重量、ランニングコスト、イニシャルコストなどを評価した。その結果より、5MW 風力発電システムとしてギア付き永久磁石発電機システムが優位であることを明らかにする。

第5章では、本研究で得られた結果と、今後の課題と展望について述べている。